

金属柱状体内部缺陷的超声检测及重构

张文学

(国网安徽亳州供电公司, 亳州 236800)

摘要: 超声检测既可检测金属柱状体工件的内部缺陷, 亦可用于工件内部的缺陷重构和类型识别。为分析柱状工件内部缺陷的特征, 提出了一种基于超声检测的金属柱状体的三维重构分析方法, 采用有限元软件进行模拟, 以得到金属柱状体工件内部的截面信号; 然后通过 B 扫描成像对其像素点进行重组; 最后利用体绘制技术对缺陷进行三维重构分析。试验结果表明, 该方法可达到良好重构与分析金属柱状体工件内部缺陷的效果, 允许误差满足要求。

关键词: 金属柱状体; 超声检测; 三维重构; 有限元仿真; B 扫描成像

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)07-0007-04

Ultrasonic detection and reconstruction of internal defects in metal cylinders

ZHANG Wenxue

(State Grid Anhui Bozhou Electric Power Company, Bozhou 236800, China)

Abstract: Ultrasonic detection can not only detect the internal defects of metal cylinder workpiece, but also be used for defect reconstruction and type identification. In order to analyze the regularity and characteristics of the internal defects of the cylindrical workpiece, a three-dimensional reconstruction analysis method of the metal cylinder based on ultrasonic detection was proposed in this paper. The finite element software was used to simulate, so as to simulate the cross-section signal of the inside of the metal cylinder. It then its pixels were reassembled by using B-scan imaging. Finally, volume rendering technique was used to reconstruct the defects. The simulation results showed that this method can achieve good results in the reconstruction and analysis of the internal defects of the metal cylinder workpiece, and the allowable errors met the requirements.

Key words: metal cylinder; ultrasonic detection; 3D reconstruction; finite element simulation; B-scanning imaging

在生活生产、设备制造及材料研究等众多领域中, 各类型的金属柱状体工件被广泛应用, 例如军工造的弹体、高铁的零部件、钢铁厂的连轴以及汽车零部件等。各类柱状体内部缺陷如未及时检出, 易带来安全隐患, 故应提高对金属柱状类产品构件质量的重视程度, 对其开展检测工作。在不同的检测技术中, 超声检测技术具有指向性清晰、灵活性高以及性能稳定等优势。对于工业产品内部零件的检测, 超声检测能较准确地定位工件内部缺陷位置, 快速识别出工件

内部缺陷种类^[1-2]。另外, 三维重构技术的应用有利于探查金属柱状体及相关产品内部零件的现存缺陷, 有助于快速掌握工件的内部情况, 捕捉内部缺陷的形态, 进而促进超声检测技术的深度应用。

工件内部缺陷的三维重构技术重点应用于生物医学领域, 其是利用切片图像进行重构的技术, 可分为表面绘制和体绘制两类^[3-4]。与表面绘制相比, 体绘制立足于更加庞大的训练数据信息, 能很好地绘制工件的内部缺陷, 从而准确地反映出工件内部的形状结构。文献[5-7]详细分析了方形孔槽和圆形孔槽缺陷的仿真模型及三维重构的优化效果, 但其分析结果在模型实际应用中难以满足全覆盖效果。文献[8]重点研究了体绘制技术在显微镜下的活鼠脑切片中的应用, 并进行三维重构, 以凸显体细胞以

收稿日期: 2022-12-19

作者简介: 张文学(1989—), 男, 本科, 工程师, 主要从事电磁无损检测新方法的研究工作

通信作者: 张文学, feifansiyue@yeah.net

及神经树的特点。

利用超声检测技术在金属柱状类产品缺陷检测中的高指向性及高灵敏性等优势,基于超声检测的体绘制技术,提出了一种对金属圆柱状体工件内部缺陷进行三维重构的方法,从而对柱状体工件的内部缺陷进行确定和类型识别。

1 缺陷回波检测与仿真

1.1 缺陷回波检测

在金属柱状体工件内部利用超声检测系统进行缺陷排查与信息采集工作,其检测的工件模型^[9]如图 1 所示。当柱状体直径为 100 mm 时,在距离核心区域约 25 mm 的位置处,模型设置了直径为 4 mm 的孔状圆形缺陷,当探头位置处于工件下方时保持静止状态,工件的回波信号采集周期设定为工件旋转一度,若想搜集 360 个回波信号则需要工件完成 360° 旋转。工件在旋转时应注意探头与孔状缺陷的位置关系,从图 1 可以看出探头和工件内部缺陷的相对位置变化。探头在运动过程中处于远端 A 位置时,远方声束能够垂直入射在工件的缺陷表面;探头到达近端 B 位置时,近方声束也能垂直入射到工件缺陷表面。试验截取到的圆周截面的 B 扫描图如图 2 所示,探头与缺陷呈现正对位置的回波信号如图 3 所示。

由图 2,3 可看出,缺陷回波的变化规律是由缺陷的形状、位置以及尺寸决定的。

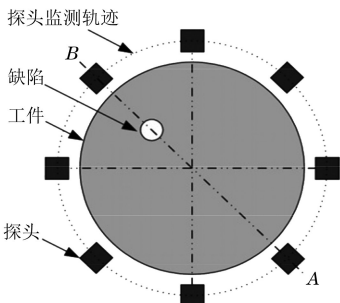


图 1 金属柱状工件检测示意

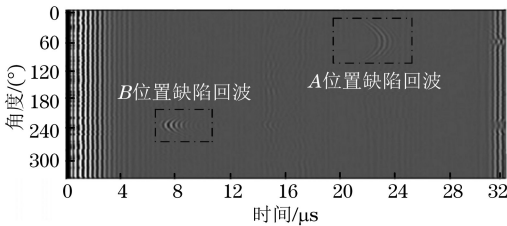


图 2 工件圆周截面的 B 扫描图

1.2 基于有限元的缺陷回波仿真

文章利用有限元软件来分析瞬态动力学的单元

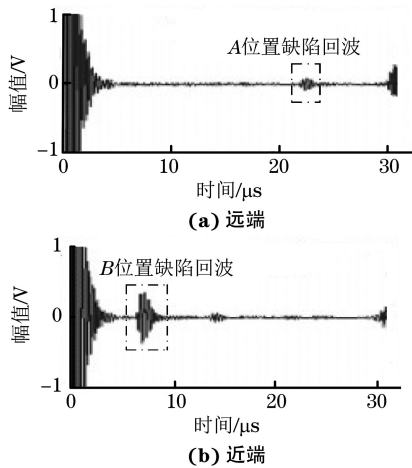


图 3 探头位置正对缺陷时的检测回波信号

模型,这一模型主要体现超声波传播过程中应力的变化形态,并基于此分析超声波传播过程中回波信号的变化。通过 B 扫描成像对如图 1 所示的金属柱状工件在正常工作形态下的回波信号变化进行模拟,得到如图 4 所示的 B 扫描图。

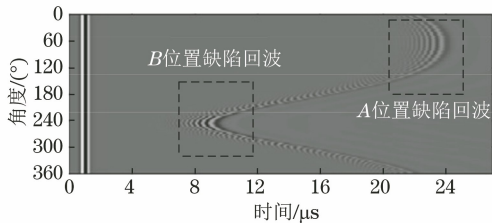


图 4 工件模拟回波信号的 B 扫描图

对图 4 中数据进行分析可知,超声检测方法能很好地反映柱状工件的内部缺陷,所呈现的变化规律与图 2 较为吻合。因此,为说明有限元仿真检测的高效性,对试验中采集到的信号数据以及回波信

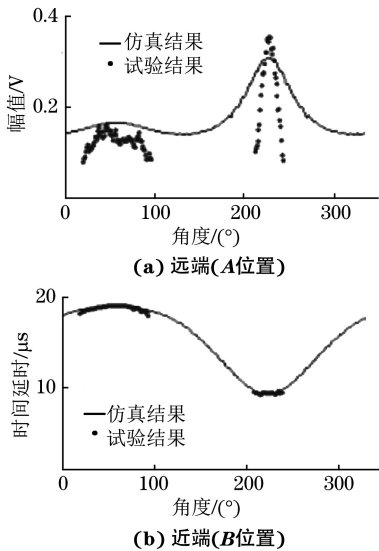


图 5 工件的仿真回波信号

号特征(幅值变化和时间延时)等信息量进行分析,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,探头在 A、B 位置附近的特征回波的规律相差不大,最主要的区别就是在仿真信号偏离比较大时信号依然存在,原因在于有限元模拟中所选取的刺激信号是点源信号,可向不同方向和不同角度进行刺激。一旦偏离角度增大,检测出的回波缺陷信号变小,但不影响同实际信号进行对比分析。

2 缺陷定位和成像分析

2.1 缺陷信息提取

为了体现金属柱状体构件的内部缺陷,利用超声检测方法进行数据采集,获得工件不同截面的扫描影像。对扫描影像进行分析可知,在短距离内,缺陷位置中心处吸收的超声波能量较大,对工件底部的回波幅值造成较大影响(使其数值降低),从而间接增加了后续成像的复杂性。基于此,对回波进行构造,其回波构造原理如图 6 所示,其中 F1 表示构件前表面;D1 表示缺陷前表面;B1 表示构件后表面,并且此位置在短距离内能够采集到回波信号;F2 表示构件前表面;D2 表示缺陷后表面;B2 表示构件在远距离下对缺陷进行检测后获得的回波信号。从图 6 可以看出,底面回波的变化幅值在试验中受圆柱体构件外部形态影响较大(幅值降低),使得 F1 与 B2、B1 与 F2 在同样的位置出现,此时如果叠加两个波形就能形成一个新的波形,那么构成的新波形中能体现表面回波以及底面回波的形态,换句话说,在此背景下采集到的完整径向信息,对后期显示成像将大有益处。为验证该方式的可行性及有效性,开展了对金属圆柱体中直径为 10 mm 的缺陷的试验检测。

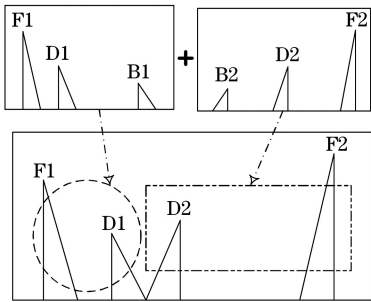


图 6 回波构造原理示意

构件回波构造效果如图 7 所示。由图 7 可以看出,缺陷前后表面时间差 Δt 为 $3.2\ \mu\text{s}$,可计算得到缺陷直径为 10.08 mm,与实际的直径 10 mm

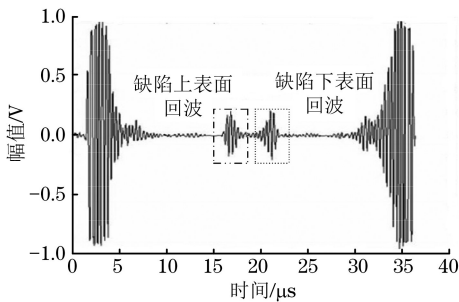


图 7 构件回波构造效果

相近。

2.2 B 扫描成像

在已有研究中,缺陷显示主要通过采集超声波信号,并对其进行扫描来获取影像。其中,B 扫描成像中的中心孔构件缺陷部分如图 8 所示,图中颜色较亮的部分体现是缺陷的前后表面。

从图 8 中,可能无法对实际构件的缺陷成像信息进行准确判断,故需要根据实际情况对圆柱体构件开展影像重组。根据式(1)将其转换到极坐标下。

$$\begin{cases} x_t = \rho \cos \theta \\ y_t = \rho \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为极坐标下像素点极径值; θ 为极坐标系中极轴旋转到像素点所需要的角度。

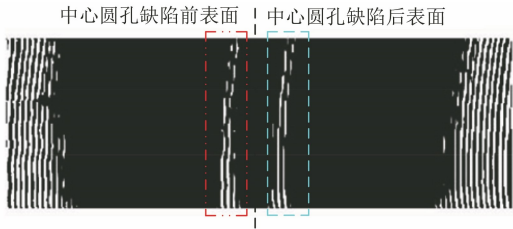


图 8 金属柱状体中心孔缺陷部分的 B 扫描成像

3 缺陷的体绘制三维重构

3.1 体绘制方法原理

体绘制方法根据视觉成像原理^[10],将每个像素都设定为视觉方向点,其在穿过物体的时候出现散射以及吸收的现象,设置合适的光照模型来增强整体数据的视觉效果,并从每个数据点位置的梯度及光照模型综合计算出数据点的光照强度,采用不同顺序的组合方法,将同一像素点的各数据的半透明彩色值进行组合并最终成像。

3.2 试验结果

在 MATLAB 软件中,通过体绘制方法重构中心孔以及偏心孔的缺陷可以从构建整体出发将其可视化,并将其视角进行转化,以此来调整透明度,如图 9 所示。

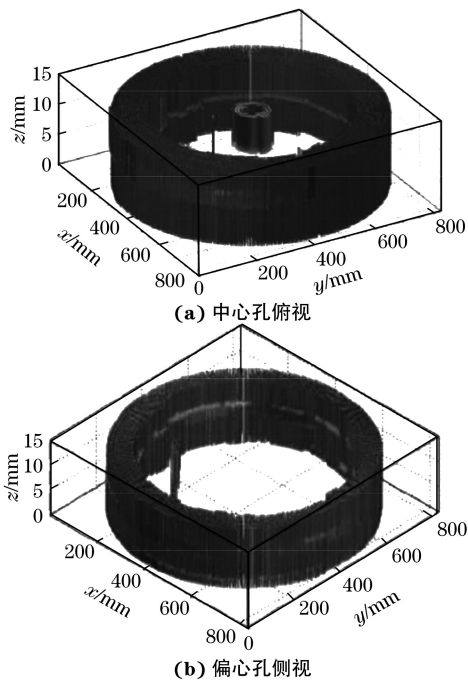


图9 缺陷的体绘制三维重建效果示意

通过计算得到重构缺陷尺寸与实际尺寸的对比图,如图 10 所示。重构深度误差如表 1 所示。

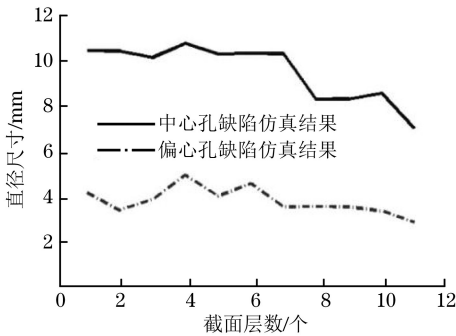


图 10 重构缺陷尺寸与实际尺寸对比

从图 10 可知,不同截面重构出的缺陷直径,从第 9 截面开始,直径开始呈现下滑趋势,这种趋势和实际情况一致。整体重构得到的结果与实际的 10 mm 直径中心孔以及 4.20 mm 直径偏心孔基本一致。

表 1 缺陷重构深度误差

缺陷类型	实际深度/mm	重构深度/mm	准确率/%
中心孔缺陷	21.32	21.10	98.9
偏心孔缺陷	21.54	21.10	97.8

4 结语

针对金属柱状体工件内部缺陷的超声检测,分析了不同工件的缺陷形状、位置的回波幅值和时间延时的规律,在底层回波信号增幅较小的情况下,需要将其截面上的所有信息都提取出来,而采用体绘制方法对缺陷的三维结构都需要建立在 B 扫描生成构件的每一个截面的基础上进行。实际的尺寸和验证重构结果相差不大,从而证明文章方法在三维重构金属圆柱体内部孔状缺陷的良好成果。

参考文献:

[1] 顾雯琪,王召巴,陈友兴. 基于轮廓线法的镁合金构件内缺陷三维反演方法研究[J]. 科学技术与工程, 2014,14(30):206-208.

[2] 陈友兴,吴其洲,刘藺慧,等. 金属柱状体工件内缺陷超声检测的特征分析[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(9):158-161.

[3] 金冬花,刘展,牛光明,等. 探讨多模态三维体绘制重建在微血管减压术术前的评估价值[J]. 实用医学杂志, 2021, 37(9):1193-1198.

[4] 易玮玮,陈子轩,徐泽楷,等. 一种基于 CPU 的三维超声图像体绘制方法[J]. 生命科学仪器, 2019, 17(1):32-36,31.

[5] 刘昊. 基于数字图像处理的工件表面裂纹三维重构研究[D]. 长春:长春理工大学,2012.

[6] 刘永强,杨世锡,刘学坤. 基于激光超声的金属构件表面微裂纹定量检测技术研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19):14-19.

[7] 袁新安,李伟,殷晓康,等. 基于 ACFM 的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构方法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10):27-33.

[8] NAKAO M, KUREBAYASHI K, SUGIURA T, et al. Visualizing in vivo brain neural structures using volume rendered feature spaces[J]. Computers in Biology and Medicine, 2014, 53:85-93.

[9] 陈自力,陈友兴. 圆锥形物体超声自动检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(11): 2947-2949.

[10] 谢亮亮,屠大维,张旭,等. 深海原位激光扫描双目立体视觉成像系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 106-114.